

# 手と物体の位置関係を基に把持姿勢を提示する遠隔 MR 協調作業

遠藤裕之<sup>†1</sup> 多々良樹<sup>†1</sup> 岡田謙一<sup>†2</sup>

近年、遠隔協調作業に複合現実感 (MR) を導入した遠隔 MR 協調作業に関する研究がなされてきた。遠隔 MR 協調作業では遠隔にいる指示者と作業者は互いに実物体を扱いながら作業を行うことが可能である。既存の研究では、遠隔の作業者に指示者の把持姿勢をリアルタイムに伝達するにはデータグローブを用いるか把持姿勢を推測する必要があった。しかしデータグローブを装着することにより、指示者の指先の感覚は鈍麻してしまう。また既存の推測手法ではリアルタイム性に欠けてしまう。そこで本稿では指示者の手と物体の位置関係を基に、指示者の把持姿勢を模した手の 3D モデルを生成し、作業者に提示する手法を提案する。指示者は作業時に手と物体の位置関係を計測するだけで、作業者に把持姿勢を伝達する事が可能となる。

## Conveyance of How to Grasp, Based on Positional Relation of Hand and Object in Remote MR Collaboration

HIROYUKI ENDO<sup>†1</sup> TATSUKI TATARA<sup>†1</sup>  
KEN-ICHI OKADA<sup>†2</sup>

Abstract: In remote collaboration, Worker and expert can have a real object each other by using MR. However it is necessary that using a data-glove or infer grasp appearance in order to an expert instruct grasp position and shape to a worker in real-time. Then, a data-glove hinders an expert's natural work. In this paper, we propose an instruction method of a state of grasp that based on only relative position of hand and object. At work, an expert can instruct grasp position and shape to a worker without a data-glove, because a system measure only hand and object position.

### 1. はじめに

遠隔での協調作業支援システムとして、遠隔にいるユーザ同士がネットワークを介して電子データを共有し、それを利用して作業支援を行うもの[1]が一般的であったが、現実空間と仮想空間を融合する技術である複合現実感(Mixed Reality: MR)技術を用いることで、遠隔間でユーザが互いに触覚のある実物体を扱いながら作業を行う事が可能となった。

MR 技術を用いた遠隔協調作業において、作業者に指示を効率良く指示するために、しばしば指示者の動作を表す仮想物(アバター)が用いられてきた。遠隔協調作業において手の仮想物を表示する際、作業対象の物体に対する把持位置と把持方法、つまり把持姿勢を特定するためには指示者が手にデータグローブを装着する必要がある。しかしデータグローブを装着することで、指示者の指先の感覚は鈍麻してしまう。データグローブを用いず、ユーザの把持姿勢を推測する手法も存在するが、これらの研究は基本的に仮想空間での仮想手の生成を目的としておりリアルタイム性に欠けるものであった。

そこで本稿では、手と物体の相対位置を基にした遠隔 MR 協調作業における把持姿勢の提示手法を提案する。この手法では、作業時に指示者の手と物体の位置姿勢のみを

計測するだけで、把持位置と把持姿勢を推測し、仮想の手モデルをリアルタイムに作業者に提示する。この手法により指示者はデータグローブを用いずとも、作業対象の物体を把持した際の把持姿勢を作業者にリアルタイムに提示する事ができる。

以降 2 章では本提案の背景および関連研究について記述する。3 章では提案手法について、4 章ではシステムの構成について述べる。5 章では実験内容について述べ、6 章では実験結果と考察について述べ、7 章でまとめとする。最後の 8 章では今後の展望について述べる。

### 2. 関連研究

#### 2.1 仮想の手による作業指示

遠隔作業において、手は豊富な伝達内容を有していることから、作業支援システムとして仮想の手を遠隔ユーザに提示する研究が多くなされてきた。

藤本ら[2]はモーションキャプチャーとデータグローブを用いる事で陶芸家の動きを取得し、バーチャル CG 動画を作成した。作業者はこの動画を見ることで自由な角度から陶芸家の手の動きを観察することができる。しかし、このシステムでは予め手の動作データを入力、設定しなければならず、リアルタイム性が必要となる遠隔協調作業を行うことは難しい。

<sup>†1</sup> 慶應義塾大学理工学部情報工学科  
Faculty of Science and Technology, Keio University

<sup>†2</sup> 慶應義塾大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Technology, Keio University

## 2.2 データグローブを用いた遠隔協調作業

遠隔協調作業においてデータグローブを用いる事により遠隔ユーザの手を仮想の手モデルで相手に提示する研究が成されてきた。

岡田ら[3]はデータグローブを用いることで仮想手を操作し、仮想空間上の物体の把持、移動を実装した。さらに仮想空間を遠隔と同期させ、仮想空間における遠隔協調作業の支援システムを実装した。また松山ら[4]は遠隔にいるユーザがお互いに実物体をもって協調作業を行う MR システムにデータグローブを導入する事を提案した。

しかしこれらの研究ではデータグローブを装着する事で、ユーザは実物体の触覚フィードバックを失ってしまう。つまり遠隔協調作業において仮想手による把持位置、把持方法の指示を行うには、データグローブを用いずに把持位置、把持姿勢の推測をし、仮想手を生成する事が望ましい。

### 2.3 把持位置、把持姿勢の推測

データグローブを用いずに把持位置、把持方法を推測する研究が成されてきた。

Matei T.ら[5]は手首と物体の相対位置を基に、予め作成しておいた把持パターンのデータベースから自然な把持位置と把持姿勢を推測した。しかし、このシステムでは把持位置、把持姿勢の推測に 5~15 秒を必要としており、リアルタイム性が低い。

山崎ら[6]は把持対象への手のアプローチの方向を入力することで、仮想空間における自然な把持動作アニメーションの作成を提案した。しかしこの研究ではアプローチの方向に対して把持姿勢が一意的に定まってしまう、“握る”や“つまむ”といった把持姿勢の区別をつけることが出来ない。

京田ら[7]は把持方法パターンを低次元化し、把持位置と把持方法を指定することで仮想空間上における自然な手のモデル生成を行った。しかし、この研究では把持位置と把持方法をユーザが直接入力する必要がある。

### 2.4 把持方法の分類

人間の物体の持ち方というのは指の可動範囲だけ無数に存在するが、一部の特殊な持ち方を除き、その多くは分類分けすることができる。

鎌倉ら[8]は日常生活における把持動作において、指と物体との接触面に注目し、まずは大まかに大項目で把持方法を 4 種類に分類分けした。握力把握では手のひら全体で物体を巻き込むように把持する。中間把握では主に親指とその他の指の側面を用いて挟み込むようにして把持する。精密把握では主に指先を使って把持する。母指不関与では親指を用いずにその他の指の側面を用いて物体を把持する。そしてさらに細かく、小項目で把持方法を 14 種類に分類した。表 1 に小項目での分類における特徴を簡単に示す。

表 1 把持方法の分類分け

Table 1 Classification of grasp shape.

| 大項目   | 小項目       | 特徴              |
|-------|-----------|-----------------|
| 握力把握  | 標準型       | 手全体で包み込む        |
|       | 釣型        | 親指を人差し指側面へつける   |
|       | 示指伸展型     | 人差し指を先端に伸ばす     |
|       | 伸展型       | 指を曲げつつ指側面で把持    |
|       | 遠位型       | 指のみで包みこむ        |
| 中間把握  | 側面把握      | 親指と人差し指側面ではさむ   |
|       | 三面把握-標準型  | 親指と人差し指先端+中指側面  |
|       | 三面把握-亜型I  | 親指と道具先端が垂直      |
|       | 三面把握-亜型II | 主に親指と中指先端+薬指    |
| 精密把握  | 並列軽屈曲把握   | 指の先端、親指とその他指で挟む |
|       | 包囲軽屈曲把握   | 球状、環状物体の把持      |
|       | 指尖把握      | 親指、人差し指の先端      |
|       | 並列伸展把握    | 親指+その他指を伸ばす     |
| 母指不関与 | 内転把握      | 親指使用せず、指側面のみで把持 |

## 3. 把持位置、把持方法の指示

### 3.1 仮想手を用いた遠隔協調作業の既存問題

2.2 節で述べたように、遠隔協調作業において指示者の手を表す仮想手を生成し、把持位置、把持方法を指示するためにデータグローブが用いられてきた。データグローブに付随しているセンサーによって各関節の角度が計測され、その値を基に仮想手を生成する。リアルタイムに各関節の角度を計測しているためシステムはリアルタイムに仮想手を生成することができる。しかしユーザはデータグローブ装着自体の違和感を覚えてしまい、さらに指先の感覚が鈍麻してしまう。また 2.3 節で述べたようにデータグローブを用いず、把持位置、把持方法の推測をし、仮想手を生成する研究が成されてきた。しかし、これらの研究は遠隔協調作業に応用するのは難しい。これらの研究は主に仮想空間上での自然な把持位置、把持方法の生成が目的であり、把持位置や把持方法を人が指定する必要があるからだ。また、予め構築した把持姿勢のデータベースの検索を行い自動で把持位置、把持姿勢を推測するシステムも存在するが、データベースの検索結果を基に推測するため時間がかかってしまい、リアルタイム性が低くなってしまふ。つまり仮想の手を用いた遠隔協調作業では、データグローブを用いずに物体の把持位置、把持方法をシステムが自動で素早く推測し相手に提示する手法が実現されていない。

### 3.2 把持位置、把持姿勢の推測

本稿では遠隔協調作業において指示者がデータグローブを用いずに物体の把持位置、把持姿勢をリアルタイムで推測し、作業者に提示する方法として、指示者の手と物体との相対位置を基とした把持姿勢の提示手法を提案する。指示者と作業者は互いに HMD を装着し、実物体に対して作業を行う。作業者は HMD を通して生成される仮想手を確認しながら指示を行う。指示者は物体を把持しているとシ

システムが認識した際、手と物体の相対位置が入力される。この相対位置を基に、仮想手を握りこませる過程における仮想手と仮想物の接触判定を用いて指示者の把持位置、把持方法の擬似的な推測をし、仮想手を生成する。生成された仮想手は作業空間にある作業物体を中心に、指示者の手と物体の位置関係を反映した位置に重畳される。作業物体を中心に仮想手が表示されるので、作業者は直感的に把持位置、把持方法を把握することが可能である。例として図1に指示者が作業物体を握っている時に作業空間に表示される仮想手を示す。

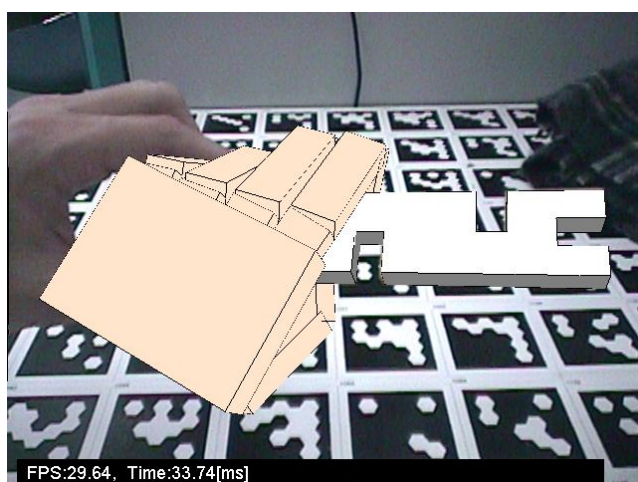


図1 作業者に提示される仮想手例  
Figure 1 The example of Virtual Hand.

本提案を用いることで、作業時において指示者が作業対象を把持するだけで、システムは指示者の手と物体の位置情報を計測し、自動的に指示者の把持位置、把持方法を推測して仮想手を生成し、作業者に提示することが出来る。これにより指示者はリアルタイムに遠隔の作業者に物体に対する把持位置、把持姿勢の指示が可能であると考えられる。また本提案では作業者は手の甲にMRマーカを取り付けるだけで良いため、データグローブを装着する必要がなく、指先の感覚を鈍麻させずに作業を行うことができる。

## 4. 実装

### 4.1 システム構成

本提案を実現するシステムの構成概要を図2に示す。MR環境の構築には、キャノン株式会社が開発したMR Platform IVを利用して行う。両眼ビデオシースルー型HMDから得た映像からMRマーカを認識し、作業空間や実物体の位置検出を行う。指示者側では手と作業対象の物体にそれぞれマーカを貼り、それぞれの位置姿勢情報を取得する。この取得した指示者側での手と物体の位置情報の変化をリアルタイムに指示者側での仮想手と仮想物の位置情報に反映させる。また手に貼るマーカについては、手の動作の

影響を考慮し、最も影響が少ないと思われる人差し指と中指の中手骨（手の甲を構成する部分）の間、中指の中手骨にマーカの左端を沿わせ、中指の第三関節（指先から第一関節、第二関節と続く）の頂点から約1cm下げた箇所に上端を沿わせるように貼付した。ビデオシースルー型HMDはキャノン社製のVH-2002を利用した。本体重量は約400g、水平視野角は51度である。本提案システムでは把持状態、非把持状態では約30fpsで動作し、把持状態の仮想手の生成時には約20fpsで動作する。これは仮想手と仮想物の衝突検出をする際、HMDのディスプレイ用ウィンドウとは別のウィンドウを描画しているためである。

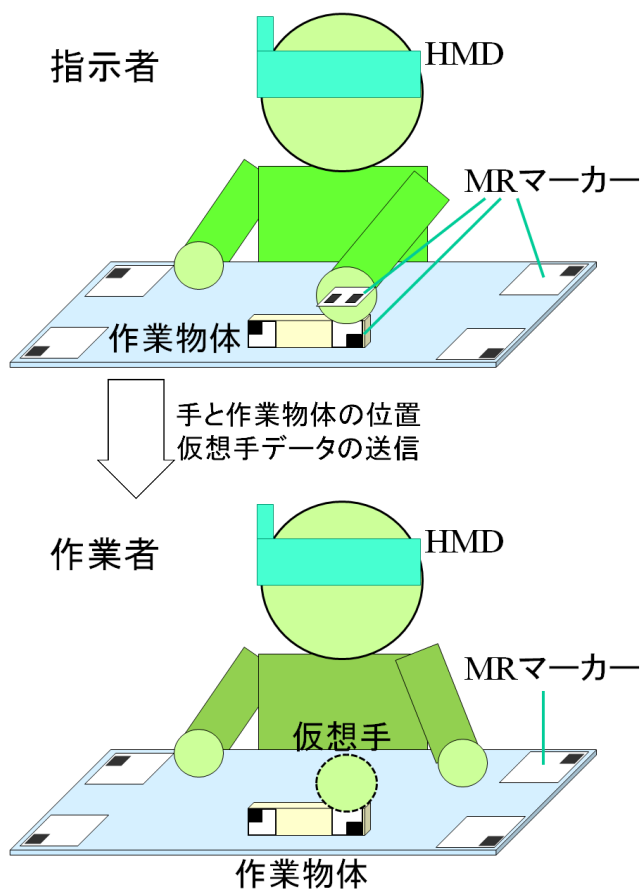


図2 システム構成

Figure 2 The configuration of System.

### 4.2 把持位置、把持方法の推測と仮想手の生成

#### (1) 仮想手モデル

本提案システムで用いた仮想手を図3に示す。仮想手は親指の2関節、親指以外の指の3関節と手の甲を構成する中手骨で構成されている。各関節には指を曲げる方向への自由度を持たせた。この関節の角度を動かすことにより、手の握りこみ動作を再現する。また本提案では仮想手と仮想物との接触判定を用いて把持位置と把持姿勢の推測を行っているが、実際の把持では各関節の根本付近で指と物体が接触しても、人は把持を安定させるために指表面を多



少物体で押し込んだ上で指を曲げていく。仮想手と仮想物の接触判定で把持位置、把持姿勢の推測を行うと、関節の根本付近で仮想物と接触する指パーツの関節が開きすぎた状態の仮想手が生成されてしまう。そこで本提案システムでは接触判定を指のパーツの上半分部分のみで行う。物体による指表面の押し込みを擬似的に再現することで、より高精度な把持位置、把持姿勢の推測が可能となる。

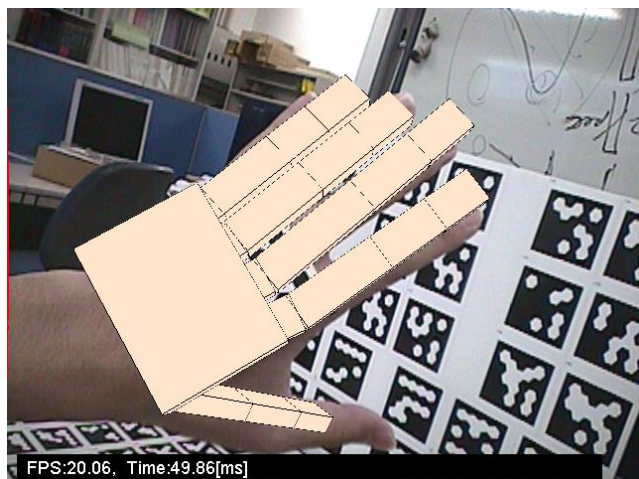


図 3 仮想手  
Figure 3 Virtual Hand.

また MR 環境においては実映像に CG が重畳されて表示されてしまい、仮想手によりユーザは自分の手を見ることができないのでキー入力により図 4 に示すように仮想手を半透明にする機能を実装した。ユーザは自分の手を見ながら把持する事が可能であり、指示者は生成される仮想手を確認しながら指示する事ができ、作業者は仮想手に自分の手を重ね合わせる事が容易になる。

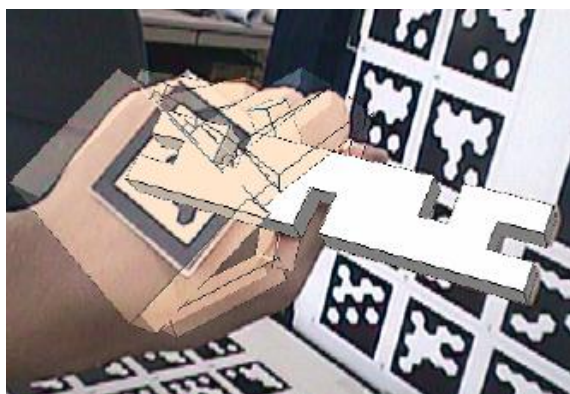


図 4 半透明化した仮想手  
Figure 4 Half-transparent Virtual Hand.

## (2) 把持の定義

3.1 節において述べたように既存の把持姿勢の推測手法ではリアルタイム性に欠けてしまう。この原因の一つに物体の持ち替えを考慮していないという点が挙げられる。例えば机の上に置いてあるペンで文字を書くという作業において、ペンを持ち上げる際にはペンをつまむように把持し、文字を書く際にはペンの先端付近を三本の指で挟み込んでいる。このように、実際の作業においては物体の持ち方というものは常に流動的である。既存のシステムでは持ち替えに対処するにはその都度、システムにユーザが指示を与える必要があった。そのためシステムにリアルタイム性を持たせるために、把持の定義を指示者の手と物体が一定範囲内にある状態で、物体の高さが一定以上、かつ手と物体の相対位置の変化量が少なくなった時、と定義した。こうする事でシステムは指示者の持ち替えに自動で対処する事ができ、指示者は作業者に現在の把持姿勢をリアルタイムに伝達することが可能となる。

## (3) 把持姿勢の推測処理

本提案システムは指示者が物体を把持しているとみなした時、手と物体の相対位置を保存し、把持位置、把持姿勢の推測を行う。はじめに世界座標系における指示者との手と物体の相対位置を基に、仮想手を中心とした仮想空間上に仮想物の配置が行われる。次に仮想手の指の屈曲動作と仮想物との接触判定を開始する。図 5.8 に推測処理のイメージを示す。指の各パーツはそのパーツ自体が仮想物と接触するか、より先端に近いパーツが物体に接触するとそのパーツにおける屈曲動作を停止する。各指の屈曲動作においては、親指以外の指では、第一関節、第二関節は第三関節が 5 度くらいの時から徐々に曲がり始め、第三関節が 40 度から 60 度くらいまで曲がると急に曲がるようになり、屈曲の終盤になるとゆっくり曲がるようになる。つまり第一関節、第二関節と第三関節の角度は S 字型の相関関係にあることが市川らの研究[9]により分かっている。また親指の第一関節、第二関節と中手骨にも、区切りの数値は異なるが同じような S 字型の相関関数にあることが分かっている[10]。また George らの研究により人間の指の第一関節と第二関節には次の式で表されるような関係にあることが分かっている[11]。  $\theta_{dip}$  は第一関節の角度、  $\theta_{pip}$  は第二関節の角度である。

$$\theta_{dip} = \frac{2}{3}\theta_{pip} \quad (1)$$

以上の各関節の関係を基に指の屈曲動作を行う。仮想手の指パーツと仮想物の接触判定については Open GL のオクルージョンクエリによる描画判定を利用し、全ての指パーツの屈曲運動が停止すると推測処理を終了する。

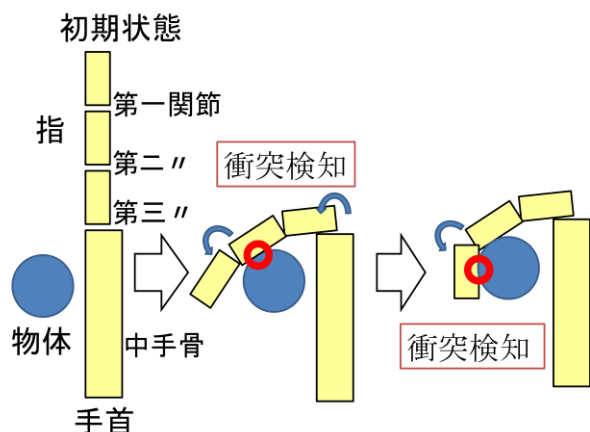


図 5 推測処理のイメージ

Figure 5 The image of inference processing.

また仮想手を構成する手の各指のパーツのサイズについては日本人の平均サイズ[12] と Fujita らの研究[13] を参考にして平均サイズの 1.1 倍を目安に指の長さを設定した。本手法における把持姿勢の推測手法では、実際には物体に触れているのに仮想手の指が屈曲運動中に仮想物と接触せず、仮想手の指が完全に屈曲してしまう場合も生じてしまう。例えば人差し指から小指のいずれかの指の第一、第二関節を伸ばしきり第三関節のみを屈曲させ親指とで挟み込み物体を把持している時、本提案手法で用いている処理では段々と第一、第二関節も屈曲していき指先が仮想物と接触しないという事態が起こる可能性がある。この時、指は完全に屈曲してしまう。そこで多少実際の指示者の指の位置とはズレが生じていても仮想手と物体が接触している方が、より指示者の把持姿勢を再現していると考えたため、平均サイズよりも多少大きめに設定した。これにより生成される仮想手の再現性はより高くなると考えられる。

## 5. 実験

本実験では遠隔 MR 協調作業において提案手法である、手と物体の相対位置を基にした把持姿勢の提示手法を用いることで、指示者から作業員への把持姿勢の伝達精度とリアルタイム性を検証するため、把持方法の伝達精度、把持位置の伝達精度、推測処理の所要時間の 3 項目を検証する。実験 1、実験 2 は指示者役、作業員役の 2 人 1 組で行った。指示者役には物体の把持方法の分類に熟知し、および MR 環境での作業経験を積んだ実験者 1 名が固定で行い、作業員役を 20 代の学生、10 名に被験者役を行ってもらった。

### 5.1 実験 1 把持方法の伝達精度

本実験では指示者の把持方法の伝達精度を検証する。指示者は鎌倉ら[8]の分類分けに基づいて各把持方法の指示を作業員に行う。作業物体は図 6 に示す木片部品とした。作業員と指示者の環境には同型、同サイズの木片部品がそれぞれ存在し、指示者は生成される仮想手を確認しながら、

鎌倉らによる分類における各把持方法で木片を把持する。作業員は表示される仮想手に重ね、安定した持ち方で木片を把持してもらう。本提案では仮想手を提示することにより、作業員が指示者の把持方法を模倣することができるか、というのが一つの論点となる。把持方法の分類を作業員が知っていた場合、作業員はその分類に照らし合わせた把持方法の予測を行ってしまう。そこで作業員には把持の分類については何も教えず、仮想手を参考にした把持を行ってもらった。作業員が把持を完了した時点で把持方法の分類に熟知した実験者により、作業員の把持方法を判定し、次の把持指示に移る。鎌倉らの分類における分類のうち、木片の形状の問題から 2 種類の把持方法を除いた 12 種類の把持方法の伝達の判定を行い、その正答率と誤った把持方法について記録した。また正答率は鎌倉らの分類における大項目と小項目についてそれぞれ検証した。

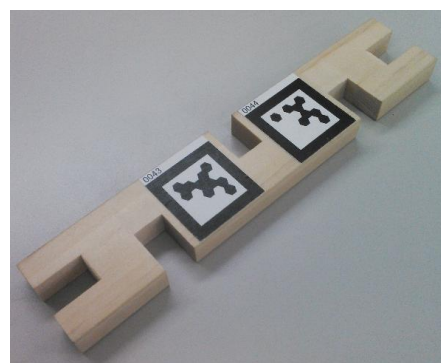


図 6 木片部品

Figure 6 Wood Block.

### 5.2 実験 2 把持位置の伝達精度

本実験では指示者の把持位置の伝達精度を検証する。指示者と作業員空間には図 7 に示すような同型、同サイズの（高さ、奥行き、幅）が（3cm, 3cm, 15cm）の箱 A、（3cm, 10cm, 10cm）の箱 B がそれぞれ存在する。作業員には指示者の指示に従い箱を持ってもらい、指示者と作業員の持った位置のズレを検証する。箱は 5mm 単位で区切っており、番号がふられている。

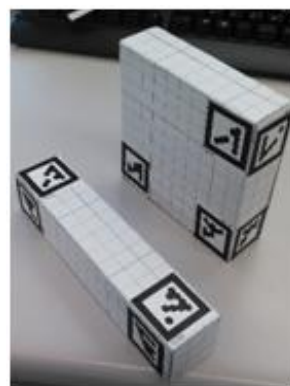


図 7 箱 A (左), 箱 B (右)

Figure 7 (left)Box A, (right)Box B.

まず横方向のズレの検証について述べる．指示者は図 7 に示すように箱 A を把持し，作業者は表示される仮想手に重ねるようにして同じく箱 A を把持してもらう．この際，両者の小指と人差し指の箱との接触面の番号を記録してもらい，この接触面の中間点を比較することにより把持位置の伝達における横方向のズレを検証する．この時，指示者と作業者の把持方法を同一にするため，指示者と作業者は人差し指と小指と第三関節の掌側の溝に，箱の淵がはまるように把持した．



図 8 箱 A の持ち方  
 Figure 8 How to grasp box A.

次に奥行き方向のズレの検証について述べる．指示者は箱 B を把持し，作業者も提示される仮想手に重ねるようにして箱 B を把持する．また奥行き方向のズレに関しては把持対象の高さによって大きな影響が出ることが考えられることから，指示者は箱 B を図 9 に示すようなパターン A，パターン B の 2 通りの向きで把持する．両者は掌から最も遠い箇所の番号を記録する．この番号を比較することにより把持位置の伝達における奥行き方向のズレを検証する．実験は箱 A に関する把持を 5 回，箱 B に関する把持をパターン A で 5 回，パターン B で 5 回の順番で行う．

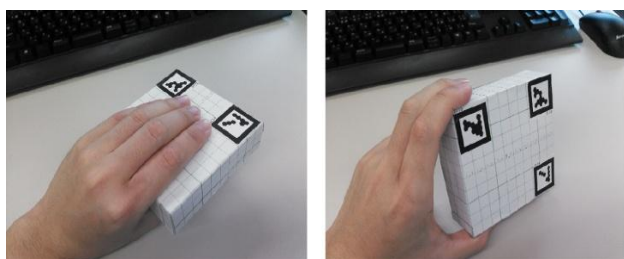


図 9 箱 B の持ち方 (左:パターン A 右:パターン B)  
 Figure 9 How to grasp box A.  
 (left)pattern A, (right)patern B

### 5.3 実験 3 推測処理の所要時間

本実験は実験者一人で行い，実験 1 と同様に木片に対して 12 種類の把持方法で把持を行う．3.2 節で述べた推測処理における推測処理開始から推測処理完了までの時間を計測することで本提案手法のリアルタイム性を検証する．12 種類の把持方法で各 10 回ずつ計測し，平均所要時間を算出する．

## 6. 結果と考察

### 6.1 実験 1 把持方法の伝達精度

作業者が正しく指示者の把持方法を模倣する事が出来た把持方法の数の平均は次の図 10 のようになった．図 11 は各把持方法における誤回答数である．

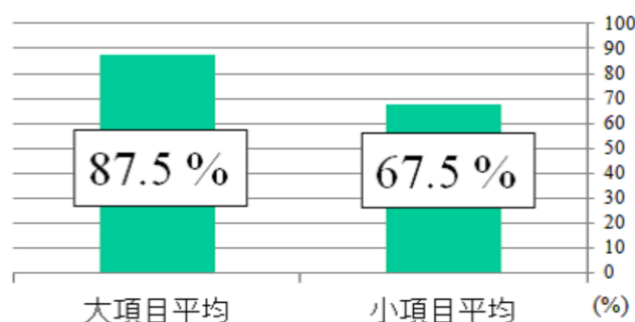


図 10 把持方法全体の正答率  
 Figure 10 The percentage of questions answered correctly

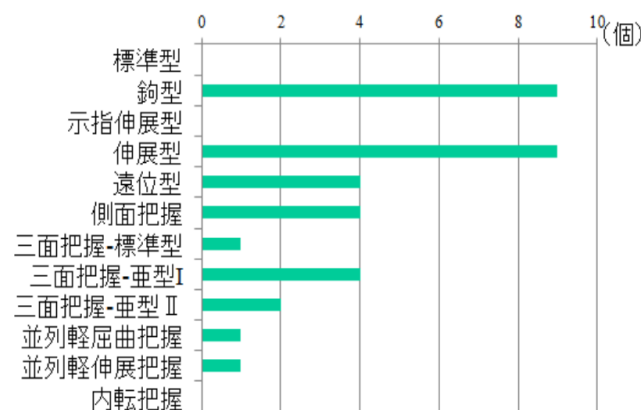


図 11 各把持方法における誤回答数  
 Figure 11 The number of mistakes.

まずは把持方法の正答率の実験結果について述べる．作業者は鎌倉らによる分類における大まかな把持分類の大項目で検証するとおよそ 9 割，細かい把持分類の小項目で検証するとおよそ 7 割を正しく指示者の把持方法を模倣することができた．しかし，図 6.11 をみても分かるように，小項目での分類においては，各把持方法での正答率が大きく異なる．特に，握力把握-鉤型，握力把握-伸展型，側面把握の正答率が低い．この結果の最も大きな原因は仮想手



の屈曲動作における親指の動きにあると考えられる。上記で挙げた各把持方法の大きな特徴として、図 12 で示すように親指の向きが指の並びに対して垂直もしくは相対するような向きになっており、位置も多くは人差し指側面付近となっている。

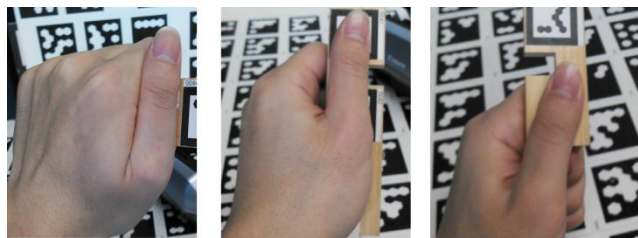


図 12 誤回答の多かった把持方法  
(左:標準把握-鉤型, 中央: 握力把握-伸展型, 右:側面把握)

Figure 12 The grasp shapes, having many mistake.

(left)Power Grip-Hook Type,  
(middle) Power Grip-Extension Type,  
(right) Lateral Grip

今回の仮想手を作成するに当たり、親指の各関節についてそれぞれ 1 自由度しか与えなかった。しかし実際の把持動作において親指は非常に大きな可動範囲を持っていることから、それぞれの把持方法における親指の動作にシステムが対応できなかったことが、これら把持方法伝達における正答率の低さにつながったと考えられる。しかし、逆に特殊な親指の動きを持たない他の把持方法については非常に高い正答率となっていることから、提案手法は一部を除いて把持方法を作業者に伝達することが可能だと考えられる。また今回は環状の物体を把持する把持方法である包囲軽曲把握、非常に小さい物体をつまむ際に用いる指尖把握の 2 つの把持方法を、作業対象に選択した木片の形状の問題から実験条件から除外したが、その他の把持方法の中にも木片の形状からは想定することが困難な把持方法も幾つか存在した。作業者には表示される仮想手に重ね合わせるように木片を把持してもらったが、木片の形状から想定することが困難な把持方法の指示がなされた時、CG に手を重ね合わせる過程で作業者が自分で把持方法を修正判断してしまった事も誤回答の原因の一つとして挙げられる。

## 6.2 実験 2 把持位置の伝達精度

指示者と作業者の把持位置の中心を比較することで得られた把持位置の横方向のズレの平均と指の届いた位置を比較することで得られた把持位置の奥行き方向のズレの平均を次の表 2 に示す。ズレの大きさは横方向のズレを「指示者の把持位置の中心 - 作業者の把持位置の中心」、奥行き方向のズレを「指示者の指の位置 - 作業者の指の位置」で求めた。

表 2 把持位置のズレ

Table 2 The position gap of grasp.

| ズレの方向 | ズレの平均      | ズレの最大値 |
|-------|------------|--------|
| 横方向   | 右方向に 1.8mm | 13mm   |
| 奥行き方向 | 奥方向に 8.4mm | 25mm   |

把持位置のズレの実験結果から、把持位置の横方向のズレに関しては小さいものとなっているが、奥行き方向のズレは指示者の把持位置よりも奥方向にズレが生じてしまった。これは仮想手モデルを作成する際、4.2 節 (3) で述べたように指示者の把持姿勢の再現性を高めるため、指の大きさを大き目に作ったことが原因だと思われる。本提案手法では手の甲の位置と物体との相対位置を基に把持姿勢を推測しているが作業者は基本的に生成された仮想手の指の配置に自分の指を合わせる。よって仮想手の指が長くなったことにより指示者の指の配置よりも奥に指を配置してしまったのだと考えられる。

## 6.3 実験 1 推測処理の所要時間

推測処理の平均所要時間は 0.90 秒であった。

この所要時間は推測手理における、フレーム毎の指の屈曲角度を大きくする事で短縮が可能だが、仮想手との接触判定を行なっているため、正確な仮想手の生成が困難となり、把持姿勢の推測精度が低くなってしまう。つまり仮想手の再現性と推測処理の所要時間はトレードオフの関係にある。

## 7. まとめ

遠隔 MR 協調作業において、仮想手を用いて作業指示を行う研究がなされてきたが、物体の把持位置、把持姿勢を作業者に指示するにはデータグローブが必要であった。データグローブを用いない把持位置、把持姿勢の推測に関する既存研究では遠隔協調作業で重要なリアルタイム性が損なわれてしまう。しかし、ユーザはデータグローブを装着することで指先の感覚が鈍麻してしまう。

そこで本稿では指示者の手と物体の相対位置を基にした把持位置と把持姿勢の提示手法を提案した。実験では遠隔 MR 環境において、遠隔の指示者の木片の持ち方を作業者に指示することで、遠隔 MR 協調作業において本提案手法はどの程度正確に作業者に指示者の指示を認識させることが出来るかを検証する。

実験の結果、指示者の把持方法の伝達における正答率は、大まかな把持分類の大項目ではおよそ 9 割、細かい把持分類の小項目ではおよそ 7 割であった。つまり大まかな把持方法の伝達は十分に可能であり一部の把持方法を除き、詳細な把持方法の伝達も可能という結果になった。また把持位置のズレに関しても、横方向のズレの平均値は右方向に 1.8mm、最大値は 13mm、奥行き方向のズレの平均値は奥方向に 8.4mm、最大値は 25mm であり、把持位置のズレは

横方向、奥行き方向共に 25mm 以内に収まる．また仮想手の推測処理の所要時間については平均 0.90 秒であることから十分にリアルタイム性はあると考えられる．よって以上の事から提案手法により遠隔 MR 協調作業において指示者はデータグローブを用いずに作業者に物体の把持姿勢をリアルタイムに伝達することが可能であると考えられる．

## 8. 今後の展望

今回はリアルタイムに指示者の把持姿勢を作業者に伝達することを目的に実装を行ったが、親指が特殊な動きをする把持方法については仮想手が実際の指示者の把持姿勢とは大きく異なってしまう、親指の動作に関してはこれから何らかの改善が必要であると考えられる．例えば、画像認識による親指の位置検出を行い親指がどの動きのパターンであるかを特定する等である．これにより仮想手の屈曲動作における親指の制限条件をより正確なものにすることができると考えられる．仮想手の屈曲運動における制限条件を綿密に設定することで、より正確な把持姿勢の仮想手の生成を検討していきたい．また、今回実装した把持姿勢の伝達手法を実際の組立て作業に組み込み、その有効性を検証していきたい．

**謝辞** 本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金（A）課題番号 22243037（2013 年）、またキヤノン株式会社の支援により行われた．

## 参考文献

- 1) 福井健太郎, 喜多野美鈴, 岡田謙一: 仮想空間を使った多点会議システム; e-MulCS, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, 3375-3384 (2002)
- 2) 藤本英雄: 動きを伴う陶芸技能の保存・伝承の試み, Civil Engineering Consultant VOL.235, pp.28-31(2007.4)
- 3) 岡田義広: 実世界指向の具象化プログラミング, 戦略的創造研究推進事業さきがけタイプ(PRESTO)研究報告会「協調と制御」領域 Symposium'05, (2005)
- 4) 松山岳史, 山本峻, 岡嶋雄太, 岡田謙一: 実物体を用いた遠隔 MR 作業支援におけるデータグローブの導入, 日本 VR 学会 第 36 回 サイバースペースと仮想都市研究会, pp.47-52 (2009)
- 5) Matei T. Ciocarlie, Peter K. Allen: Hand Posture Subspaces for Dexterous Robotic Grasping, The International Journal of Robotics Research July 2009 vol. 28 no. 7, pp.851-867, (2009)
- 6) 山崎仁之: 把持対象に注目した動作計測に基づく手のアニメーション, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科修士論文 (2006).
- 7) 京田文人, 斉藤豪: 物体形状に対応する手の把持姿勢の生成手法, 第 73 回全国大会講演論文集, pp.5-7 (2003)
- 8) 鎌倉矩子: 手のかたち手のうごき医歯薬出版, (1989).
- 9) 市川亮: 物体の把握・操作時における指関節の動きモデル, 和歌山大学学士学位論文, 2002.
- 10) 山本三四郎, 舟橋健司: 一般家庭への普及を考慮したイメージベースデータグローブの検討, 日本バーチャルリアリティ学会第 15 回大会講演論文集, 2A2-5(DVD-ROM),(2010).
- 11) George ElKoura, Karan Singh: Handrix: Animating the Human Hand, Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation,(2003)

- 12) 河内まき子: AIST 日本人の手の寸法データ, <http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/hand/index.html>, 2012
- 13) 藤田直己: 手指中手骨関節の形態学的研究神戸大学医学部紀要, 第 51 巻, 第 4 号, 1990